خطوط النقل والألياف البصرية

خصائص الإرسال عبر الألياف البصرية

الوحدة الثالثة : خصائص الإرسال عبر الألياف البصرية

الجدارة: القدرة على التعرف على خصائص ومشاكل الإرسال عبر الألياف البصرية وطرق حسابها...

الأهداف: عندما تكتمل هذه الوحدة تكون لدى المتدرب القدرة على أن:

- يدرس مشكلة التوهين وكيفية حسابها.
- يتعامل مع وحدة الديسبل وتطبيقاتها.
- يدرس مشكلة التشتيت وأنواعها.
- يعرف كيفية احتساب عرض النطاق لليف وسرعة الإرسال.

مستوى الاداء المطلوب: أن يصل المتدرب على اتقان الجدارة بنسبة ٩٠٪

الوقت المتوقع للتدريب على الجدارة: ٦ ساعات.

الوسائل المساعدة:

- السبورة.
- استخدام برنامج "Power Point" لعرض محاضرات خصائص الإرسال عبر الألياف البصرية.

متطلبات الجدارة:- أن يكون المتدرب ملماً بمحتوى الوحدة الثانية.

خصائص الإرسال عبر الألياف البصرية

Transmission Characteristics of Optical Fibers

مقدمة

من خصائص الإرسال عبر الألياف البصرية تضمنها العوامل التي تؤثر على أداء أنظمة الاتصالات البصرية والتي سوف تؤثر سلباً على تحديد سرعة نقل المعلومات وبالتالي سعة النظام ككل و تحديد مسافة الإرسال. سوف نركز في هذه الوحدة على عاملين مهمين: الأول هو التوهين (Attenuation) والثاني هو التشتيت (Dispersion).

٣- ١ التوهين Attenuation

يعتبر التوهين مشكلة أساسية في أنظمة الاتصالات على اختلاف أشكالها، وفي حالة استخدام الألياف البصرية فإن التوهين وما يصاحبه من فقد (Loss) للقدرة البصرية (Optical Power) يعتبر من العناصر الأساسية في التصميم والذي يؤدي بدوره إلى تحديد (تقليل) مسافة الإرسال بين محطات التقوية وإعادة البث (المعيدات Repeaters). يحدث الفقد في مواقع مختلفة على الخط: المدخل (Input) والمخرج (Output) ومواقع الربط (Connecting points) وكذلك داخل الليف نفسه و سوف يكون تركيزنا في هذه الوحدة على دراسة الفقد داخل الليف: أسبابه وكيفية احتسابه.

يمكننا تعريف التوهين لليف البصري بأنه قياس الفاقد في القدرة البصرية بين المدخل والمخرج، ويرمز له بالرمز (α). عملياً تستخدم الوحدات اللوغارتمية لإيجاد التوهين لليف البصري من العلاقة التالية:

$$\alpha_{dB} = 10\, Log\ [\ P_{in}\ /\ P_{out}\ ] \qquad (3.1)$$

حيث إن: - α_{dB} ترمز الى التوهين بوحدة الديسبل.

- P_{in} ترمز إلى القدرة البصرية على مدخل الليف.
- P_{out} ترمز إلى القدرة البصرية على مخرج الليف.





شكل (٣- ١) القدرة على مدخل ومخرج الليف البصري

في أنظمة الاتصالات البصرية عادة ما يتم احتساب التوهين للكيلومتر الواحد من طول الخط وفقاً للعلاقة التالية:

$$\alpha\ (dB/km) = \frac{1}{L}\left[10 \operatorname{Log} \frac{P_{in}}{P_{out}}\right] \qquad (3.2)$$

حيث - L ترمز إلى طول الليف بالكيلومتر (km).

قبل أن نبدأ بدراسة أسباب التوهين نتعرف على استخدام وحدة الديسبل (dB) وتطبيقاتها في نظم الاتصالات.

٣- ١- ١ وحدة الديسبل Decibel Unit "dB"

غالباً ما نستخدم في أنظمة الاتصالات المختلفة وحدة الديسبل و يرمز لها اختصاراً (dB) والتي تستخدم في حالتين:

- **الحالة الأولى:**

للتعبير عن العلاقة بين قيمتين وإيجاد نسبة بعضهما إلى بعض (مثل القدرة على مدخل الخط مقارنة مع القدرة على مخرج الخط أو الإشارة على مدخل مكبّر الإشارة نسبة إلى قيمتها على المخرج). وبذلك فإن وحدة الديسبل تستخدم هنا للتعبير عن التوهين كما هو الحال في خطوط النقل أو عن التكبير كما هو الحال في المكبّرات (Amplifiers). فلو فرضنا أن لدينا القيمة العددية التالية (x / y) حيث(x)و(y) لهما قيم القدرة:

$$x / y = 100$$

$$10 \operatorname{Log}\ x / y = 10 \operatorname{Log} 100 = 20\ dB$$

إذا كان (x)و (y) لهما قيم التيار أو الجهد فيجب ضرب اللوغاريتم بالقيمة (20) بدلاً من (10).

وبنفس الطريقة السابقة يمكننا ملء الجدول (٣- ١):

جدول (٣- ١) التحويل إلى الديسبل

x / y	10 Log (x / y), dB
2	3
10	10
1000	30
0.01	-20
0.0001	-40
0.5	-3
40	16.02
250	23.98
107	70
10-3	-30

- **الحالة الثانية:**

تستخدم وحدة الديسبل للتعبير عن مستوى القدرة (Power Level) في أي مكان عبر خط النقل حيث أصبحت أجهزة قياس القدرة (Power Meters) تعطينا القراءات بالديسبل، لكن في هذه الحالة يلزمنا قيمة مرجعية (Reference Value) للقسمة عليها.

- إذا كانت القيمة المرجعية تساوي (1 Watt) فإن الوحدة في هذه الحالة تكون (dBw)

$$P_{dBw} = 10 \text{ Log} [\text{ power}/ 1W] \quad dBw$$

- إذا كانت القيمة المرجعية تساوي (1milliwatt) فإن الوحدة في هذه الحالة تكون (dBm)

$$P_{dBm} = 10 \text{ Log } [\text{ power}/ 1mW] \quad dBm$$

- إذا كانت القيمة المرجعية تساوي (1 microwatt) فإن الوحدة في هذه الحالة تكون (dBμ)

$$P_{dB\mu} = 10 \text{ Log } [\text{ power}/ 1\mu W] \quad dB\mu$$

كتطبيق على ذلك نقدم المثال التالي بالجدول (٣- ٢)

جدول (٣- ٢) تحويل قيم القدرة إلى مستواها بالديسبل

Power	Power Level
1 W	0 dBw
100 W	20 dBw
10 mW	- 20 dBw
1mW	0 dBm
0.5 mW	- 3dBm
1 W	30 dBm
0.1 mW	-10 dBm
2 mW	3 dBm
1 μW	0 dBμ
1 mW	30 dBμ
1 W	60 dBμ
0.8 mW	- 0.97 dBw
0.2 mW	- 7 dBm
20 μW	13 dBμ
400 μW	-4 dBm

مثال (٣- ١):-

لديك خط اتصال بصري بطول (8 km) إذا علمت أن قيمة القدرة على مدخل الخط (120 µW) والقدرة على المخرج تساوي (3 µW). أوجد:

(أ) التوهين الكلي للخط.

(ب) التوهين للكيلومتر الواحد.

(ت) التوهين لخط طوله (10 km) علماً بأنه من نفس نوع الليف السابق ويتم استخدام اللحام للتوصيل كل (1 km) والفقد في كل نقطة لحام يساوي (1 dB).

(ث) أوجد القيمة العددية للعلاقة بين قيمة القدرة على المدخل وقيمتها على المخرج.

الحل

(أ) لحساب التوهين الكلي نستخدم العلاقة (٣- ١):

$$\alpha_{dB} = 10 \log P_{in} / P_{out}$$

$$= 10 \text{ Log } 120\ \mu w\ /\ 3\ \mu w$$

$$= 10 \log 40 = 16 dB$$

(ب) التوهين للكيلومتر الواحد= التوهين الكلي مقسوما على طول الخط بالكيلومتر

$$=16 \text{ dB} / 8 \text{ km} = 2 \text{ dB/km}$$

(ت) التوهين الكامل للخط بطول (10 km) وبمعامل توهين (2 dB/km) يساوي التوهين للكيلومتر الواحد مضروبا في طول الخط بالكيلومتر:

$$=2 \times 10 = 20 \text{ dB}$$

يضاف إلى هذا الرقم الفقد الناتج عن مجموع نقاط اللحام حيث إن:

عدد نقاط اللحام = (الطول الكلي للخط)\(المسافة بين نقاط اللحام)- ١

وبعد التعويض ينتج أن عدد نقاط اللحام تساوي (9) نقاط.

التوهين بسبب اللحام يساوي عدد النقاط ضرب الفقد للنقطة الواحدة = 9 dB

التوهين الكلي يساوي= توهين الخط + التوهين الناتج عن اللحام

=20 dB + 9 dB = 29 dB

(ث) القيمة العددية للعلاقة بين القدرة على مدخل ومخرج الخط

$$P_{in} / P_{out} = 10^{0.1*29} = 10^{2.9} = 794.3$$

٣- ١- ٢ أسباب التوهين

هنالك العديد من الأسباب المسؤولة عن حدوث التوهين في الألياف البصرية والتي تعتمد في الغالب على بنية الزجاج وتصنيعه وتركيبة الليف. ومن هذه الاسباب:

أ- **امتصاص الضوء** Light Absorption

كما هو معروف فإن غالبية الألياف البصرية تصنّع من مادة السيليكا (Silica) (ثاني أكسيد السيليكون SiO_2) وهي المادة التي يصنع منها الزجاج حيث تتم إضافة مواد معينة (مثل الجرمانيوم) وبنسب معينة إلى الزجاج للحصول على معاملات انكسار مختلفة. عادة ما يمتص الزجاج الضوء الساقط عليه وتسمى هذه العملية الامتصاص الضمني أو الداخلي (Intrinsic Absorption) وبالتالي يتسبب في زيادة الفقد على أطوال موجية معينة ويظهر ذلك على شكل انبعاث حراري (Heat) حيث نجد أن أعلى مستويات الامتصاص على الأمواج فوق البنفسجية وتحت الحمراء، ولحسن الحظ فإن قيمة الامتصاص في منطقة الأمواج غير المرئية (بين 800 nm و 1600 nm) التي تعمل عليها الألياف البصرية قليلة جداً.

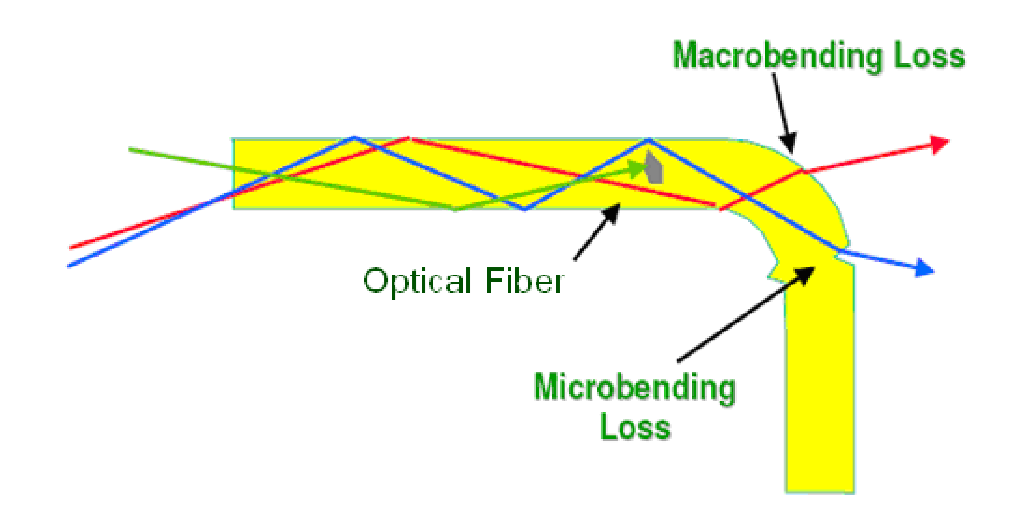
علاوة على ما سبق، تتواجد الشوائب (مثل أيونات الهيدروكسيل OH ions) في مادة السيليكا والتي تمتص الضوء عند أطوال الموجات التي تعمل عليها الألياف البصرية مما يؤدي إلى زيادة الفقد. لهذا السبب يجب أن يكون الزجاج عالي النقاوة وشبه خالٍ من الشوائب، كذلك فإن وصول الماء أو الرطوبة إلى الألياف يؤدي إلى زيادة امتصاص هذه الأيونات للضوء وبالتالي زيادة الفقد.

ب- التناثر Scattering

عندما يمر الضوء عبر الزجاج فإن جزءً من طاقته تتناثر ويعود ذلك إلى تركيبة الزجاج حيث تصبح كثافة الزجاج غير متجانسة بعد عملية التصنيع مما يؤدي إلى عدم ثبات قيمة معامل الانكسار وهذا هو السبب في تناثر الضوء الذي يكون عادة عشوائياً. يسمى هذا التناثر بتناثر رالي (Rayleigh Scattering) ويتناسب بشكل عكسي مع (λ^4)، لذلك فإن تأثيره يزداد على أطوال الموجات الأقصر. هنالك التناثر الناتج عن وجود جسيمات (شوائب) كبيرة الحجم نسبياً مما يؤدي إلى تناثر الضوء عند اصطدامه بها.

ج- المشاكل الهندسية Geometric Problems

هنالك أكثر من نوع من التأثيرات الهندسية التي تؤثر على خصائص الليف، منها ما ينتج عن الانحناءات الكبيرة (Macrobendings) والثاني ما ينتج عن الانحناءات الدقيقة (Microbendings)، شكل (٣- ٢). عادة ما تحدث الانحناءات الكبيرة عند لف الليف على البكرات أو أثناء التركيب (Installation) ويجب الانتباه إلى قيمة أقل نصف قطر انحناء مسموح به (Minimum Bend radius) والذي يُعطى ضمن مواصفات وخصائص الليف. إن تجاوز انحناء الليف هذه القيمة يؤدي إلى زيادة الفقد وإلى كسر الليف أحياناً.



الشكل (٣- ٢) الانحناءات الكبيرة والصغيرة



تحدث الانحناءات الدقيقة نتيجة أخطاء مصنعية أو ضغوط على الأغلفة التي تحيط بالليف، حيث تؤدي هذه الانحناءات إلى خلل في زوايا سقوط الضوء (بزاوية أقل من الزاوية الحرجة "Φ_c") و إلى التداخل بين الأنماط (Mode Coupling) مما ينتج عنه زيادة في الضوء الفاقد.

٣- ١- ٣ العوامل التي تؤثر في قيمة الفقد

يتضح لنا مما سبق بأن قيمة الضوء الفاقد تعتمد على:

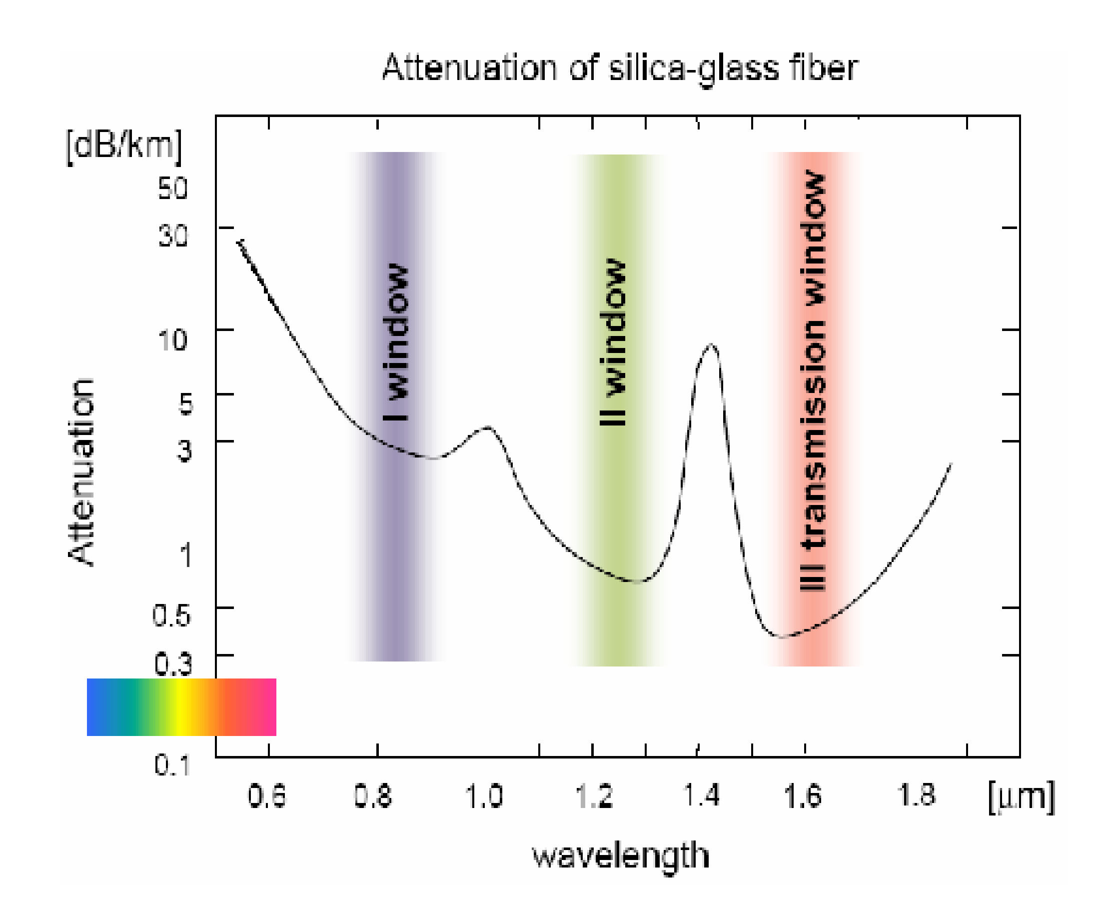
- نوع الليف (أحادي أو متعدد النمط)
- ظروف التشغيل
- طريقة تصنيع الليف
- نوع المادة المصنوع منها الليف (الزجاج أو البلاستيك)
- الطول الموجي الذي يعمل عنده الليف.

كمحصلة نهائية للأسباب السابقة تتغير قيمة التوهين في الليف البصري بالاعتماد على الطول الموجي للضوء المنتشر خلاله. وفقاً للشكل (٣- ٣) نجد أن أقل فقد على الأطوال الموجية التالية:

- $\lambda = 850$ nm والتي تسمى النافذة الأولى (First Window)
- $\lambda = 1300$ nm والتي تسمى النافذة الثانية (Second Window)
- $\lambda = 1550$ nm والتي تسمى النافذة الثالثة (Third Window)

تستخدم النافذة الأولى في المسافات القصيرة وعلى سرعات بث قليلة، بينما تستخدم النافذة الثانية والثالثة في المسافات البعيدة وعلى سرعات البث العالية.

إن أفضل طول موجي من ناحية أقل توهين ممكن هو (1550 nm) (التوهين أقل من 0.2 dB/km).

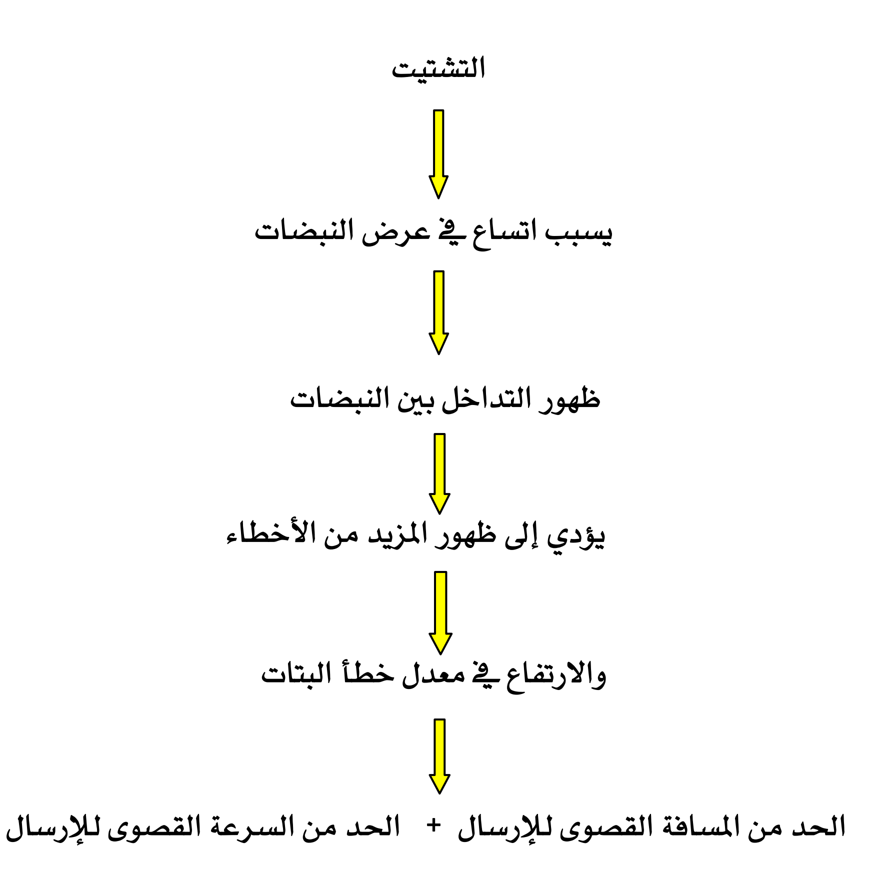


الشكل (٣- ٣) تغير التوهين في الليف البصري مع الطول الموجي

٣- ٢ التشتيت Dispersion

يعتبر التشتيت من المشاكل الرئيسة في أنظمة اتصالات الألياف البصرية، حيث يتسبب التشتيت في تشويه الإشارة (Signal Distortion) سواء في حالة الأنظمة التماثلية (Analog Systems) أو الرقمية (Digital Systems). إن التأثير الأكبر للتشتيت يظهر في حالة الأنظمة الرقمية وذلك على شكل اتساع (Broadening) في عرض النبضات البصرية المرسلة عبر الليف (الشكل ٣- ٤) والذي يزيد بزيادة المسافة المقطوعة. تؤدي هذه الظاهرة السلبية إلى حصول تداخل بين النبضات المرسلة (Intersymbol Interference)، وزيادة هذه الظاهرة يؤدي إلى زيادة ظهور الأخطاء (Errors) والتي تؤدي إلى زيادة معدل خطأ البيانات (Bit Error Rate) ويرمز لها اختصاراً (BER).

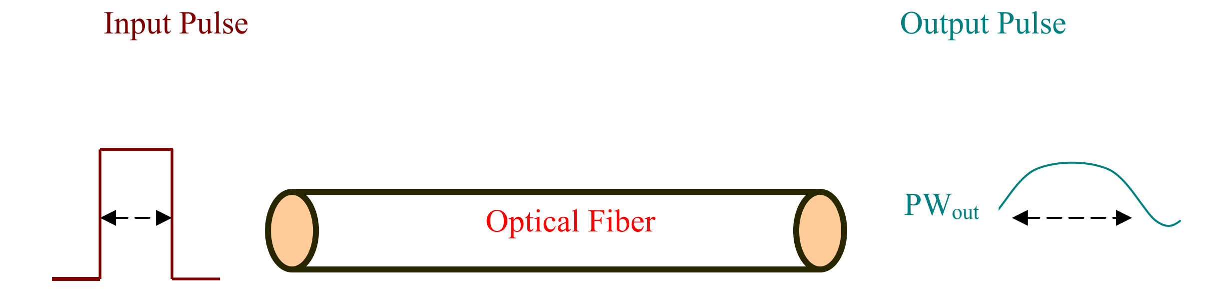
- يمكننا تمثيل تأثير التشتيت على بالتخطيط التالي:



وتأتي أهمية التشتيت بأن قيمته هي التي تحدد أهم عاملين في نظم الاتصالات البصرية وهما:

- سرعة الإرسال القصوى (Maximum Bit Rate)
- مسافة الإرسال القصوى (Maximum Transmission Distance)،

وكما هو واضح من الشكل (٣- ٤) فإن عرض النبضة على المدخل (PW_{in}) قد اتسع بعد



الشكل (٣- ٤) اتساع عرض النبضة الضوئية أثناء انتشارها عبر الليف البصري

مرورها عبر الليف وأصبح (PW_{out}). من هنا يمكننا تعريف التشتيت (Δt) وفقاً للعلاقة التالية:

$$\Delta t = \sqrt{\left(PW_{in}^{2} - PW_{out}^{2}\right)} \qquad (3.3)$$

وتعتمد (Δt) بشكل أساسي على طول الليف حيث يزداد التشتيت مع زيادة الطول ومن هنا فإن التشتيت يعطى في مواصفات الليف بوحدة الزمن لكل كيلومتر [ns/km] أو [ps/km].

و ينقسم التشتيت إلى التشتيت الضمني والتشتيت الباطني والذي بدوره ينقسم الى تشتيت المادة وتشتيت دليل الموجة.

٣- ٢- ١ التشتيت الباطني Intramodal Dispersion

إن هذا النوع من التشتيت والذي يظهر في جميع أنواع الألياف أحادية ومتعددة النمط والذي يسمى أيضاً تشتيت اللون (Chromatic Dispersion)، وسبب هذه التسمية يعود إلى كون الضوء ينبعث من مصادره كحزمة من الأطوال الموجية وليس طول موجي واحد (كما هو معروف من الفيزياء، فإن كل طول موجي مرتبط بلون معين والعكس صحيح، ومن هنا جاءت التسمية التشتيت اللوني (Chromatic) وليس أحادي اللون (Monochromatic). ويتقسم هذا النوع من التشتيت الي نوعين هما:-

أ- تشتيت المادة Material Dispersion

كما أشرنا سابقاً، فإن الضوء ينبعث من المصدر على أطوال موجية مختلفة والتي سوف تنتشر عبر الليف على سرعات مختلفة وذلك حسب طولها الموجي مما يؤدي إلى وصولها نهاية الليف بأوقات مختلفة وهذا هو السبب في حصول تشتت المادة الذي يؤدي إلى اتساع عرض النبضة وبالتالي تشويهها. للتقليل من هذه الظاهرة يجب استخدام مصادر ضوئية ذات حزم إشعاعية ضيقة (Narrow Spectral Linewidth).

ب- تشتيت دليل الموجة Waveguide Dispersion

نظراً لاختلاف معامل الانكسار لكل من اللب والغشاء لليف البصري فإن الضوء ينتشر بسرعات مختلفة مما يؤدي إلى تفاوت زمني (Propagation Delay) والذي يتسبب في حصول تشتيت دليل الموجة.

عادة ما تكون قيمة تشتيت دليل الموجة قليلة مقارنة مع تشتيت المادة وكلا النوعين يعتمد على الطول الموجي (λ). و عند الطول الموجي (1310 nm) تتحقق الخاصية الهامة التالية: يكون تشتيت الدليل الموجي سالباً وتشتيت المادة موجباً ومجموعهما صفر. لذلك فإن أفضل طول موجي من ناحية التشتيت هو (1310 nm) حيث يسمى الطول الموجي ذو التشتيت الصفري (Zero-Dispersion Wavelength). لكن أفضل طول موجي من ناحية التوهين هو (1550 nm) ولهذا فقد تم تصميم ألياف بصرية يكون فيها التشتيت الصفري على الطول الموجي (1550 nm) حيث تسمى الألياف ذات التشتيت الصفري المزاح (Dispersion Shifted Fibers) والمعروفة اختصاراً (DSF). في الواقع العملي، تكون قيم تشتيت دليل الموجة ضئيلة جداً للألياف متعددة النمط بينما تُعطى لحالة الليف أحادي النمط ضمن مواصفاته.

٣- ٢- ٢ التشتيت الضمني " النمطي" Intermodal Dispersion

التشتيت الضمني أو الداخلي والذي يطلق عليه أيضاً في بعض المراجع تشتيت النمط (Multimode Dispersion) حيث يظهر هذا النوع من التشتيت في الألياف متعددة الانماط فقط، ففي الليف البصري متعدد الأنماط تسلك الحزم الضوئية مسارات مختلفة في الطول لكنها جميعها لها نفس السرعة مما يجعلها تصل نهاية الليف بأزمان مختلفة ولهذا يحصل الاتساع في عرض النبضات وما يتبعه من تشتيت. ويكون مقدار هذا الاتساع عالياً نسبياً في النوع العتبي من الألياف،أما في الألياف أحادية النمط فلا وجود لهذا التشتيت بسبب وجود نمط واحد فقط ينتشر عبر الليف.

٣- ٣ عرض النطاق لليف ومعدل المعلومات Fiber Bandwidth and Information Rate

يعتبر عرض النطاق (Bandwidth) والذي سنرمز له اختصاراً (BW) كأداة لقياس سعة نقل المعلومات لليف البصري وكما أشرنا سابقاً فإن التشتيت هو العامل المحدد لقيمة عرض النطاق. في حالة الأنظمة الرقمية عادة ما نستخدم سرعة إرسال البتات (Transmission Bit Rate) والتي سنرمز لها اختصاراً (BR) أو معدل المعلومات (Information Rate) والتي تعرّف بعدد البتات التي يمكن إرسالها في الثانية الواحدة عبر قناة الاتصال (الليف البصري). يمكننا توضيح العلاقة بين عرض النطاق وسرعة البتات بالاعتماد على نوع الشفرة (Code):

- في حالة شفرة عدم الرجوع للصفر (NRZ- Code)

$$BW = BR$$

- في حالة شفرة الرجوع للصفر (RZ- Code)

BW = BR/2

يمكننا إيجاد أقصى سرعة إرسال للبتات حسب العلاقة التالية:

$$BR_{\max} = \frac{0.2}{\sigma} \quad bps \qquad (3.4)$$

حيث ترمز (σ) إلى جذر متوسط التربيع لاتساع عرض النبضات على مخرج الليف. عادة ما تقدم الشركات الصانعة ضمن المواصفات الفنية لليف قيمة حاصل ضرب عرض النطاق و الطول (BW×L) والتي يمكننا حسابها وفقاً للعلاقة التالية:

$$BW \times L = \frac{0.2}{\sigma_T} \qquad (3.5)$$

حيث ترمز(σ_T) إلى جذر متوسط التربيع الكلي لاتساع عرض النبضات للكيلومتر الواحد فقط.

تدريبات على الوحدة الثالثة

تمرين١: أكمل الجدول المبين أدناه:

P_{in} / P_{out}	P_{in} / P_{out} in dB
1	
8	
300	
0.02	
0.0004	
105	
10-6	

تمرين٢: أكمل الجدول المبين أدناه:

Power	Power Level
2 W	…… dBw
0.8 W	…… dBw
5 mW	…… dBm
12 mW	…… dBw
0.3 mW	…… dBm
40 µW	…… dBµ
10 mW	…… dBµ

تمرين٣: لديك خط نقل يستخدم ليفاً بصرياً بطول (6 km) . إذا علمت أن قيمة القدرة الداخلة على الليف تساوي (2 mW) والقدرة الخارجة منه تساوي (200 µW).

أوجد: (أ) معدل التوهين للكيلومتر الواحد.

(ب) طول الخط الجديد إذا علمت أن التوهين الكلي يساوي (15 dB) بمعدل (2 dB/km).

تمرين٤: أوجد قيمة القدرة الخارجة من ليف بصري بمعدل توهين (0.8 dB/km) وبطول (10 km) إذا كانت قيمة القدرة الداخلة (0.5 mW).

تمرين٥: لديك خط اتصال بصري بطول (8 km) لبناء هذا الخط تم استخدام ليف بصري متعدد النمط وعملية اللحام الكهربائي. إذا علمت أن طول البكرة الواحدة (2 km) والفقد في كل نقطة لحام يساوي (0.5 dB).

أوجد: (أ) التوهين الكلي إذا كانت القدرة على المدخل تساوي (1 mW) وعلى المخرج (10 µW).

(ب) التوهين للكيلومتر الواحد لنفس معطيات الفقرة (أ).

تمرين٦: لديك ليف بصري أحادي النمط بطول (10 km) وبمعدل جذر متوسط التربيع (5 ns/km). أوجد عرض النطاق لهذا الليف.

تمرين٧: على أي أساس تم تحديد النوافذ الموجية الثلاثة.

تمرين ٨: وضّح المقصود بألياف التشتيت المزاح.

تمرين٩: وضّح كيفية الحصول على التشتيت الصفري.

تمرين١٠: اذكر العوامل التي تعتمد عليها قيمة التوهين لليف البصري.